

П.О. Генцарь, С.М. Левицький

**Вплив лазерного опромінення на оптичні властивості
високоомних кристалів CdTe та твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe***Інститут фізики напівпровідників ім. В.С. Лаїкарьова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: rastneg@isp.kiev.ua, levytskyi@ua.fm*

В даній роботі проведено оптичні дослідження спектрів пропускання та відбивання монокристалів *p*-CdTe (111); твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$) в діапазоні $(0,2 - 1,7) \cdot 10^{-6}$ м до та після лазерного опромінення на довжині світлової хвилі $\lambda = 532$ нм в інтервалі енергій 66 - 164 мДж/см² для CdTe (111) та в інтервалі енергій 46,6 мДж/см²-163,5 мДж/см² для Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$). Встановлено, що основним механізмом впливу імпульсного лазерного опромінення на оптичні властивості тонких приповерхневих шарів досліджених кристалів є структурне гетерування, тобто поглинання, обумовлене наявністю ділянок напівпровідників що мають дефектну структуру і володіють здатністю активно поглинати точкові дефекти і зв'язувати домішки.

Ключові слова: CdTe, CdZnTe, пропускання, відбивання, поглинання, лазерне опромінення.*Стаття поступила до редакції 31.08.2019; прийнята до друку 15.03.2020.***Вступ**

Напівпровідникові матеріали A^{IV}B^{VI}, зокрема CdTe та Cd_{1-x}Zn_xTe, є одними із найперспективніших матеріалів, які використовують для детекторів різного роду іонізуючого випромінювання [1-4].

I. Експериментальні результати та їх обговорення

В даній роботі з метою з'ясування механізмів впливу імпульсного лазерного опромінення на тонкі приповерхневі шари напівпровідників поміряно спектри пропускання та відбивання монокристалів *p*-CdTe (111) із питомим опором $\rho = (2 \div 5) \cdot 10^9$ Ом·см; твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$) із питомим опором $\rho = (0,5 \div 3) \cdot 10^{10}$ Ом·см в діапазоні $(0,2 - 1,7) \cdot 10^{-6}$ м до та після лазерного опромінення на довжині світлової хвилі $\lambda = 532$ нм в інтервалі енергій 66 - 164 мДж/см² для CdTe (111) та в інтервалі енергій 46,6 мДж/см²-163,5 мДж/см² для Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$).

На рис. 1 показано оптичні спектри пропускання

$T = f(\lambda)$ монокристалів *p*-CdTe (111) із питомим опором $\rho = (2 \div 5) \cdot 10^9$ Ом·см (вихідний зразок – крива 1 та зразки опромінені густинами енергій 66 мДж/см²; 108 мДж/см²; 164 мДж/см² криві 2 - 4, відповідно). Як видно із рисунку пропускання монокристалів *p*-CdTe (111) зменшується тільки при опроміненні густиною енергії 108 мДж/см². При лазерній обробці даних зразків густинами енергії 66 мДж/см²; 164 мДж/см² пропускання практично співпадає із пропусканням вихідних зразків. Даний експериментальний факт свідчить, що при даній лазерній обробці монокристалів *p*-CdTe (111) в оптичних спектрах основну роль відіграють тонкі приповерхневі шари досліджуваного матеріалу, тобто зміни, що відбуваються поблизу поверхні напівпровідникового матеріалу.

На рис. 2 показано оптичні спектри пропускання $T = f(\lambda)$ твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$) із питомим опором $\rho = (0,5 \div 3) \cdot 10^{10}$ Ом·см (вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2-4, відповідно). Як видно із рисунку при опроміненні твердих розчинів Cd_{1-x}Zn_xTe ($x = 0,1$) густинами енергій 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см² пропускання

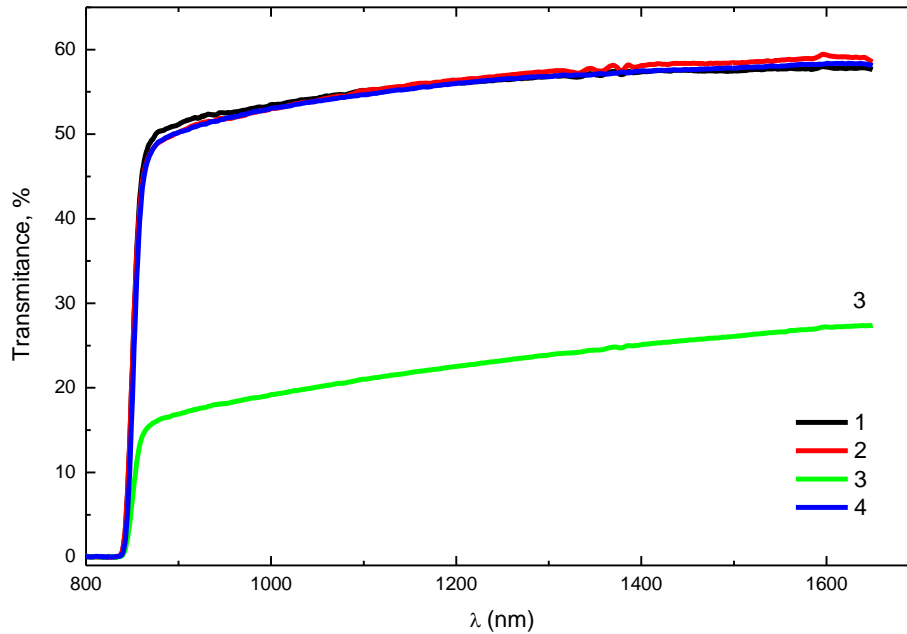


Рис. 1. Спектри пропускання монокристалів p -CdTe (111): вихідний зразок - крива 1 та зразки, опромінені енергіями 66 мДж/см²; 108 мДж/см²; 164 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

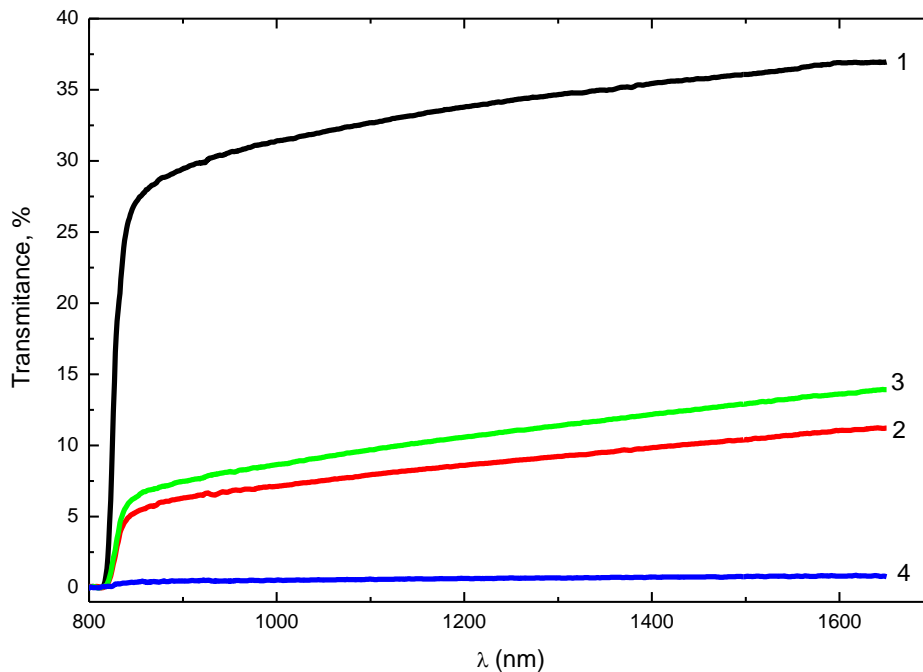


Рис. 2. Спектри пропускання твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x=0,1$): вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

даного твердого о розчину суттєво зменшується в порівнянні із вихідними зразками, а при лазерній обробці густиною енергії 163,5 мДж/см² твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) пропускання практично дорівнює нулю (крива 4).

В роботах [5, 6] було відмічено, що спектри оптичного відбивання (рис. 3, 4) монокристалів p -CdTe(111) та твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) показали, що при даній лазерній обробці відбувається

лазерно-стимульоване збільшення відбиваючої здатності вказаних напівпровідникових матеріалів (інтегральний ефект пояснено відмінностями оптичних характеристик приповерхневого шару та об'єму матеріалу, тобто комплексний показник заломлення приповерхневого шару $\tilde{n}_s = n_s + i\chi_s$ відрізняється від комплексного показника

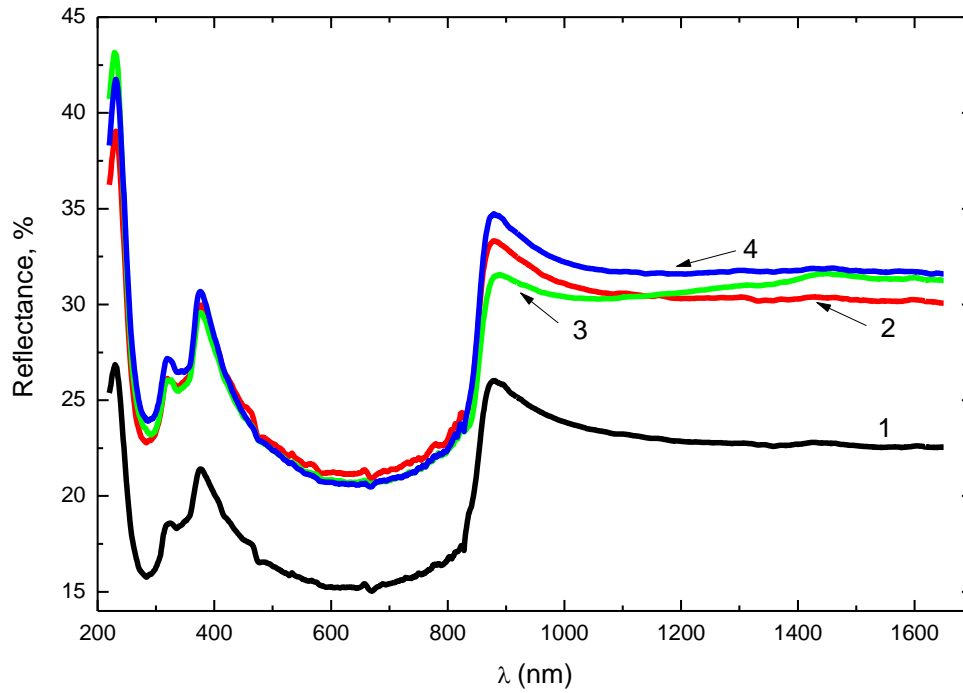


Рис. 3. Спектри відбивання монокристалів $p\text{-CdTe}$ (111): вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями 66 мДж/см²; 108 мДж/см²; 164 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

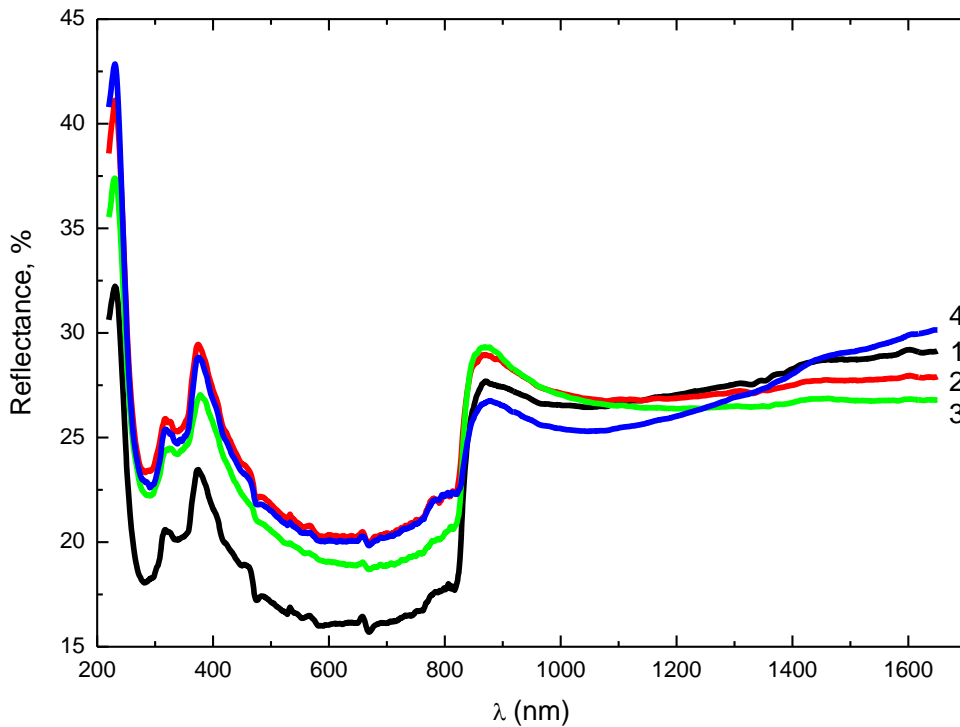


Рис. 4. Спектри відбивання твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x=0,1$): вихідний зразок - крива 1 та зразки опромінені енергіями 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

заломлення об'ємного матеріалу $\tilde{n}_v = n_v + i\chi_v$).

Оскільки коефіцієнт відбивання $R = f(\lambda)$ пов'язаний із коефіцієнтом пропускання $T = f(\lambda)$ і коефіцієнтом поглинання $D = f(\lambda)$ співвідношенням

$R+T+D=1$ (при цьому розсіювання світлової хвилі в досліджуваному зразку не враховується), то в даній роботі також побудовано спектри поглинання $D=1-(R+T)$ від довжини світлової (електромагнітної) хвилі λ .

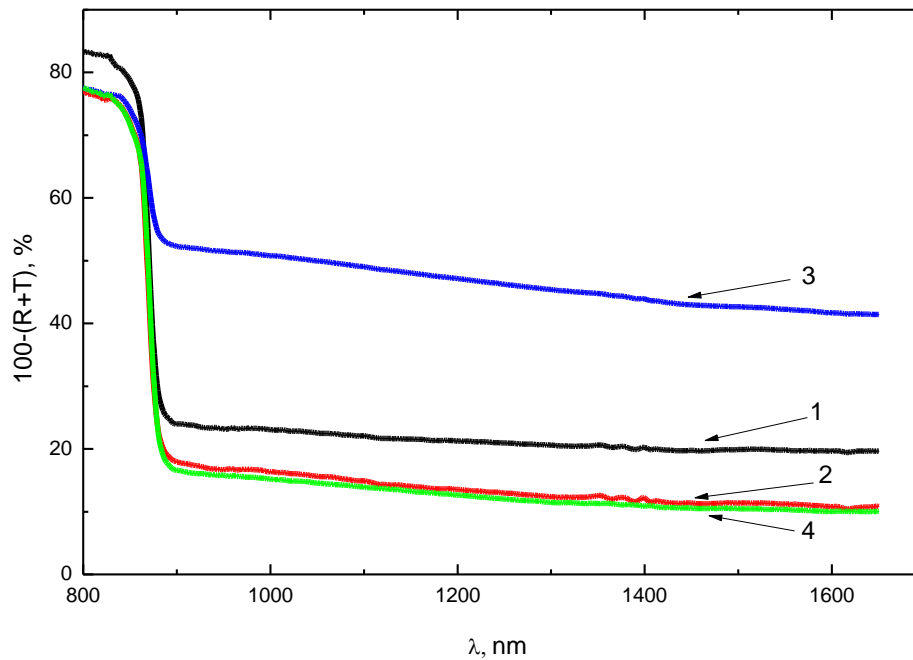


Рис. 5. Спектри поглинання монокристалів p -CdTe (111): вихідний зразок - крива 1 та зразки, опромінені енергіями 66 мДж/см²; 108 мДж/см²; 164 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

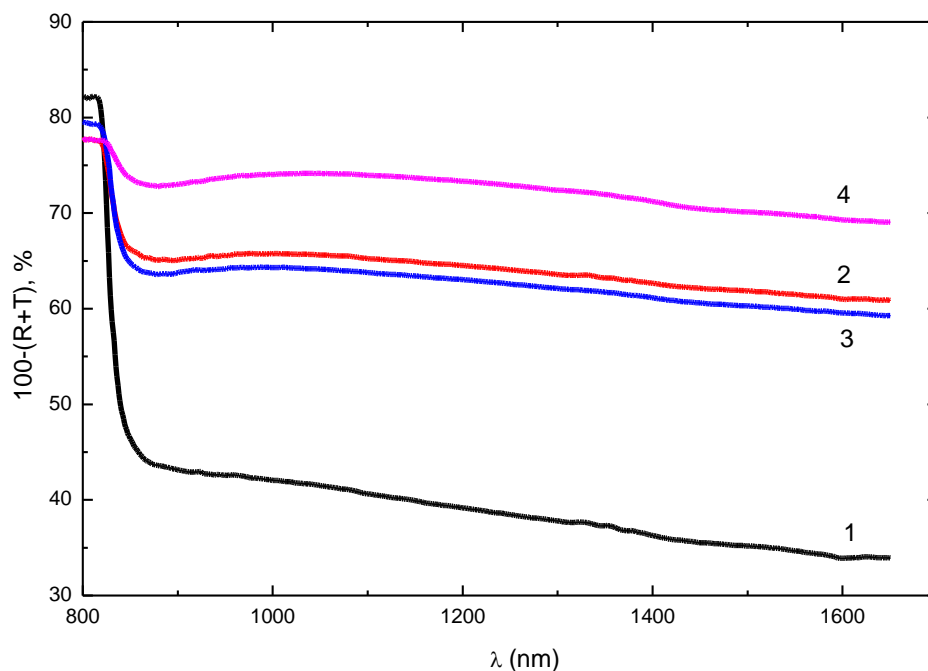


Рис. 6. Спектри поглинання твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x=0,1$): вихідний зразок - крива 1 та зразки, опромінені енергіями 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² криві 2-4 відповідно.

Побудовані оптичні спектри поглинання $D = [I - (T+R)] = f(\lambda)$ вказаних матеріалів повністю корелюють із оптичними спектрами пропускання $T = f(\lambda)$ та відбивання $R = f(\lambda)$. Із спектрів поглинання (рис. 5, 6) досліджуваних матеріалів видно, що у низькоенергетичній області спектрів, тобто при енергіях світлової (електромагнітної) хвилі E , які значно менші від енергії фундаментального оптичного переходу E_0 , вказаних матеріалів, поглинання монокристалів p -CdTe (111) після

лазерної обробки густинами енергії 66 мДж/см²; 164 мДж/см² стає меншим у порівнянні із вихідними зразками (рис. 5, криві 1, 2, 4). При лазерній обробці монокристалів p -CdTe (111) густиною енергії 108 мДж/см² поглинання досліджуваних зразків значно збільшується (рис. 5 крива 3). Для твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) поглинання досліджуваних зразків значно збільшується при лазерній обробці густинами енергії 46,6 мДж/см²; 102,3 мДж/см²; 163,5 мДж/см² у порівнянні із

вихідними зразками (рис. 6, криві 1 - 4).

Виходячи з принципу невизначеності Гейзенберга для енергії E і часу t ($\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$) релаксаційні ефекти в поглинанні світла кристалом описують параметром уширення $\Delta E = \hbar / \tau$ (уширення електронного переходу E_0 пов'язане з часом життя вільних носіїв заряду через взаємодію їх з коливаннями ґратки, домішками, дефектами в тому числі і поверхневого характеру), де τ – час енергетичної релаксації фото-генерованих пар.

Згідно експериментальних даних, по оптичних спектрах пропускання та відбивання (рис. 1 - 4) для монокристалів p -CdTe (111) із питомим опором $\rho = (2 \div 5) \cdot 10^9$ Ом·см; твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) із питомим опором $\rho = (0,5 \div 3) \cdot 10^{10}$ Ом·см енергетичне уширення оптичних спектрів даних матеріалів дорівнює 0,049 еВ; 0,075 еВ відповідно.

Час енергетичної релаксації фотогенерованих пар τ для монокристалів p -CdTe (111); твердих розчинів $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) дорівнює $1,343 \cdot 10^{-14}$ с; $0,878 \cdot 10^{-14}$ с відповідно.

Згідно літературних даних [7-9] оксидні покриття

поверхонь досліджених матеріалів – це аморфні плівки, товщина яких коливається в границях 0,5 - 0,7 нм. Слід відмітити, що на інтерфейсі напівпровідник-окисел існує перехідний шар окислу.

Висновки

Експериментальні дослідження показали, що основним механізмом впливу імпульсного лазерного опромінення на оптичні властивості тонких приповерхневих шарів досліджених кристалів є структурне гетерування, тобто поглинання, обумовлене наявністю ділянок напівпровідників що мають дефектну структуру і володіють здатністю активно поглинати точкові дефекти і зв'язувати домішки. В монокристалах p -CdTe (111) та твердих розчинах $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0,1$) роль гетера виконують окисли кадмію, телуру, цинку та їх комплекси.

Генцарь П.О. – старший науковий співробітник;
Левицький С.М. – старший науковий співробітник.

- [1] Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, Є.В. Корбут, М.М. Борисюк, Телурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості (Іван Федоров, Київ, 2000).
- [2] В.І. Хіврич, Ефекти компенсації та проникаючої радіації в монокристалах CdTe (Інститут ядерних досліджень, Київ, 2010).
- [3] T.E. Schlesinger, J.E. Toney, H. Yoon, E.Y. Lee, B.A. Brunett, L. Franks, R.B. James, Materials Science and Engineering 32, 103 (2001) ([https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00027-4)).
- [4] V.A. Gnatyuk, T. Aoki, O.I. Vlasenko, S.N. Levytskyi, 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), (IEEE, Valencia, 2011), p. 4506.
- [5] П.О. Генцарь, О.І. Власенко, С.М. Левицький, В.А. Гнатюк, ФХТТ 15(4), 856 (2014).
- [6] П.О. Генцарь, О.І. Власенко, С.М. Левицький, V Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка», (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, 2018), с. 12.
- [7] Ф.Бехштедт, Р.Эндерлайн, Поверхности и границам раздела полупроводников (Мир, Москва, 1990).
- [8] Проблемы физики поверхности полупроводников (Наукова думка, Київ, 1981).
- [9] В.Е. Примаченко, О.В. Снитко, Физика легированной металлами поверхности полупроводников (Наукова думка, Київ, 1988).

P.O. Gentsar, S.M. Levytskyi

Influence of Laser Radiation on Optical Properties of High Resistivity Crystals CdTe and Solid Solutions $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$

V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: rastneg@isp.kiev.ua, levytskyi@ua.fm

In this paper, the transmission and reflection spectra of p -CdTe (111) single crystals are measured; solid solutions of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.1$) in the range $(0.2 - 1.7) \cdot 10^{-6}$ m before and after laser irradiation at the wavelength $\lambda = 532$ nm in the energy range 66 - 164 mJ/cm² for CdTe(111) and in the energy range 46.6 mJ/cm² - 163.5 mJ/cm² for $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($x = 0.1$). It is established that the main mechanism of influence of pulsed laser irradiation on the optical properties of thin surface layers of the investigated crystals is structural gettering, that is, the absorption due to the presence of sections of semiconductors that have a defective structure and have the ability to actively absorb defects and points.

Key words: CdTe, CdZnTe, transmission, reflection, absorption, laser irradiation.